

Как долго живет комета?

Планеты Солнечной системы обычно разделяют на две большие группы. Ближайшие к Солнцу планеты Меркурий, Венера, Земля и Марс образуют земную группу. Химический состав поверхности этих планет примерно одинаков. Планеты гиганты Юпитер, Сатурн, Нептун и Уран, по наблюдениям издалека, имеют в составе своей «поверхности» много водорода и гелия.

Существует также большое количество малых планет (астероидов) которые, по своему химическому составу не сильно отличаются от планет земной группы. Иногда в окрестность Солнца, занятую планетами земной группы, залетают кометы, состав которых во многом отличается как от планет-гигантов, так и от планет земной группы. Существует гипотеза, согласно которой за пределами орбиты Плутона в Солнечной системе существует огромное количество малых небесных тел, в так называемом «облаке Оорта». Они вращаются вместе с пылью и газом как правило в том же направлении вокруг Солнца, что и большие планеты. Эти тела движутся очень медленно, но иногда, пролетая мимо друг друга на небольшом расстоянии, могут значительно изменить свою скорость по направлению. Если одно из них в результате такой встречи передаст другому телу значительную часть своего момента импульса относительно Солнца, то само оно попадет на другую орбиту, которая проходит вблизи Солнца. Такое тело, как говорят, «сваливается» из облака Оорта в окрестность Солнца. В зависимости от величины своей скорости на большом расстоянии от Солнца тело может стать «одноразовой» или длиннопериодической кометой. Пролетая вблизи какой-нибудь из больших планет, такое тело может снова изменить свою скорость (совершить гравитационный маневр) и иногда становится кометой с небольшим периодом обращения.

Астрономические наблюдения спектров излучения хвостов комет дают основания считать, что ядра комет (и их поверхность) составлены из летучих веществ, например воды, метана, аммиака. Самостоятельным и весьма интересным является вопрос о природе существенных различий в химическом составе планет гигантов, планет земной группы и комет. Однако оставим его на будущее. А сами попытаемся найти ответ на другой вопрос: Как долго живет ледяное ядро кометы? Велико время его жизни или мало по сравнению со временем существования Солнечной системы?

Представим себе, что на круговой орбите с радиусом равным половине расстояния от Земли до Солнца (0,5 а.е.) появился ледяной астероид, имеющий форму шара и начальную температуру 0К и начальный радиус 1км. Пусть наш астероид достаточно быстро вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости орбиты. Будем считать, что большая часть (75%) солнечной радиации отражается от поверхности астероида. Оценим время жизни такого астероида, если никаких катастрофических столкновений с ним не произойдет.

Молекулы воды, оторвавшиеся от поверхности льда, могут удерживаться собственным гравитационным полем астероида только в том случае, если скорость их теплового движения во много раз меньше второй космической скорости. Для астероида выбранных нами размеров эта скорость равна примерно 0,7 м/с¹. Ясно, что гравитационное притяжение астероида не сможет удержать молекулы воды, оторвавшиеся от его поверхности. То есть атмосферы вокруг астероида не будет. Покинувшие поверхность астероида молекулы практически никогда не возвращаются обратно. Максимальная линейная скорость на экваторе астероида, связанная с вращением, не должна быть слишком большой, чтобы астероид не развалился на части, если, например, растрескается на куски. Скорость движения его частиц на экваторе должна быть меньше первой космической скорости, в нашем случае – меньше 0,5 м/с. Следовательно, астероид должен совершать один оборот за время, большее $2\pi R/v \approx 10^4$ с. Это около трех часов.

Ясно, что наибольший поток солнечной радиации будет приходиться на единицу поверхности астероида вблизи «экватора» астероида. Вспомним, что Солнечная постоянная – мощность W излучения Солнца, падающего перпендикулярно на площадку в 1м² на Земле, – равна $W=1,36$ кВт. Такая же мощность будет поглощаться каждым квадратным метром льда вблизи экватора астероида. Дело в том, что за счет приближения астероида к Солнцу поток излучения увеличивается в 4 раза, но 75% этого потока отражается поверхностью.

Средняя мощность, приходящаяся на 1 м² поверхности вблизи экватора астероида, усредненная за большое время, будет равна $2W/(2\pi) = W/\pi = 433$ Вт. Обоснование такой оценки довольно простое: выберем полосу шириной $h = 1$ м, проходящую по всему экватору астероида. Эта полоса собирает солнечный свет с площади $h \times 2R$. Полная площадь этой полосы равна $h \times 2\pi R$.

¹ Способ расчета первой и второй космических скоростей известен и поэтому не приводится.

Рассмотрим следующую ситуацию. Как только астероид появляется на орбите и освещается Солнцем, температура его поверхности начинает повышаться. Внешние слои льда, постепенно прогреваясь, передают теплоту и внутренним слоям. По мере разогрева поверхности все большую роль начинает играть рассеяние теплоты в окружающее пространство.

Расход теплоты льдом, нагретым на поверхности астероида, происходит по нескольким причинам: Первая из них – испарение льда, вторая – тепловое излучение, третья – прогрев внутренних областей астероида.²

Оценим среднюю температуру, которая может установиться на поверхности астероида через некоторое достаточно большое время после его появления на орбите. Ориентироваться будем на среднюю температуру поверхности Земли, равную примерно 290К. Земля теряет энергию, в основном, за счет теплового излучения. Поверхность Земли больше чем на 70 % покрыта водой, и поглощает Земля на единицу площади в среднем столько же, сколько наш астероид, поэтому очевидно, что выше температуры 290К средняя температура поверхности астероида быть не может.

Лед обладает плохой теплопроводностью, поэтому поверхность астероида вблизи экватора быстро прогревается. Коэффициент теплопроводности льда равен примерно 2,2 Вт/(м К). Для того, чтобы отводить всю теплоту, выделяющуюся на поверхности астероида вблизи экватора, нужно, чтобы скорость изменения температуры с глубиной (градиент температуры) равнялась 200 К/м.

Предположим, что прогревается только слой льда толщиной 290/200 м (~1,5м). Оценим время, за которое этот слой льда может прогреться (до температуры 290/2 К). При заданном градиенте температур (200 К/м) в куб льда с ребром $A = 1,5$ м перпендикулярно одной из его граней поступает мощность излучения $A^2 \times 440$ Вт. На нагрев этого куба требуется количество теплоты $Q = C \times \Delta T \times M$. Из справочных данных теплоемкость льда C равна примерно 2100 Дж/кг/К, разность температур ΔT (средняя от 0 К до 290 К) около 150 К, а масса куба M примерно 3000 кг. Время, необходимое для прогрева такого куба, составляет около 10^6 с, это чуть больше 10 суток. За это время градиент температуры существенно уменьшится, и поток теплоты внутрь астероида перестанет компенсировать поступление теплоты на его поверхность. Известно, что время жизни

² Теплота, полученная внутренними областями астероида, в конце концов будет потрачена на то, чтобы испарять лед с его поверхности или на ее тепловое излучение.

астероида гораздо больше 10 суток, поэтому при оценке температуры поверхности астероида можно не учитывать поток теплоты внутрь астероида.

Мощность теплового излучения с поверхности площадью S равна $\alpha S\sigma T^4$. Здесь σ - постоянная Стефана-Больцмана - равная $5,67 \times 10^{-8} (\text{Вт м}^{-2} \text{К}^{-4})$, T – температура поверхности в градусах Кельвина. Символом α обозначен коэффициент, характеризующий отличие излучающего тела от абсолютно черного тела. Для нашего случая этот коэффициент оказывается порядка 1. Дело в том, что астероид поглощает излучение Солнца в видимом диапазоне, а излучает в диапазоне инфракрасных волн. Если бы астероид терял теплоту только за счет излучения, то на его поверхности вблизи экватора установилась бы такая температура, что $\alpha S\sigma T^4 = 433 \text{ Вт}$. Отсюда следует, что температура была бы как раз равна 290 К!! Однако мы совсем не учли потери теплоты, связанные с испарением молекул с поверхности.

А какая же все-таки температура установится на поверхности льда?

Количество молекул, испаряющихся с единицы поверхности за единицу времени, можно оценить, зная давление насыщенного пара данного вещества при выбранной температуре. Давление P равно nkT . Количество молекул, покидающих поверхность тела, граничащую с насыщенным паром, по порядку величины равно числу ударов молекул пара о поверхность. Представим себе, что каждая ударившаяся о поверхность молекула «прилипает» к ней. Тогда ровно такое же количество молекул должно отрываться от поверхности и покидать ее за то же время.³ Каждая испарившаяся с поверхности нашего астероида молекула «уносит» с собой энергию, которая потребовалась ей для отрыва от соседок, и вдобавок среднюю тепловую энергию, соответствующую данной температуре поверхности. Над поверхностью астероида нет атмосферы, поэтому пар не совершает работы по расширению в атмосфере. Молярная теплота парообразования воды (и льда тоже) равна примерно $\beta = 3,6 \cdot 10^4 \text{ Дж/моль}$. С единицы поверхности астероида каждую секунду уносится количество теплоты Q , которое приблизительно равно:

³ На самом деле количество покидающих поверхность молекул в несколько раз меньше. Это связано с тем, что не все молекулы сразу после удара «прилипают» к поверхности. Большинство упруго отскакивают от поверхности.

$$Q \approx \left(\frac{\beta}{A}\right) \frac{P}{kT} \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \frac{P\beta\sqrt{3}}{\sqrt{RT\mu}} \approx 1,6 \times 10^5 \frac{P}{\sqrt{T}} \text{ (СИ)}$$

В этой формуле A – это число Авогадро. С учетом соотношения Больцмана для концентраций молекул, находящихся в тепловом равновесии в состояниях разными потенциальными энергиями, эту формулу можно преобразовать в:

$$Q \approx \left(\frac{\beta\rho}{\mu}\right) \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \exp\left(-\frac{\beta}{RT}\right)$$

Здесь ρ – плотность воды или льда, μ – его молярная масса.. Чтобы не полагаться на теорию, воспользуемся экспериментальными данными о зависимости давления насыщенного пара от температуры.

Таблица.

Зависимость давления насыщенных паров воды от температуры.												
143	152	161	171	183	197	212	231	253	281	319	373	T (K)
-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	lg(P/P _{атм})

Приведенная выше таблица взята из справочника «Физические величины».

Зависимость потерь теплоты, связанных с испарением воды, от температуры (расчет).												
143	152	161	171	183	197	212						T (K)
0,013	0,13	1,3	12,3	120	1150	11000						W (Вт/м ²)

Оценки показывают, что на поверхности астероида вблизи его экватора должна установиться температура между 183К и 197К. При таких температурах потери на излучение с 1м² составляют от 70Вт при 183К до 92 Вт при 197К.⁴ Поэтому необходимо признать, что главным механизмом расхода теплоты с поверхности астероида будет испарение с его поверхности. Оно обеспечивает, как видно, около 80% всех потерь.

Оценим время жизни ледяного астероида, если потери тепла обусловлены только испарением с его поверхности.

Очевидно, что испарение в экваториальной зоне идет значительно быстрее, чем на полюсах астероида. В результате такого неравномерного испарения он приобретает вытянутую вдоль оси

⁴ Как будет зависеть от времени «суток» температура поверхности на астероиде? – Это отдельный интересный вопрос.

вращения форму. Скорость уменьшения размеров астероида на экваторе не зависит от размеров астероида и определяется балансом энергии, полученной от Солнца и потерянной за счет испарения, и равна $W_{\mu}/(\pi r) \approx 2 \times 10^{-7} \text{ м/с}$. Это означает, что радиус экваториальной зоны астероида уменьшается (в среднем) на $2 \times 10^{-7} \text{ м}$ за каждую секунду. Чтобы астероид полностью испарился требуется $2,5 \times 10^9 \text{ с}$. Таким образом, наш астероид может прожить около 80 лет!

По меркам Солнечной системы 80 лет – это совсем немного.

Реально существующие ледяные кометы, конечно же, не попадают на круговую орбиту вокруг Солнца. Периодические кометы большую часть времени проводят на значительном удалении от нашего светила. Однако именно в то время, когда они находятся на сравнительно небольших расстояниях от Солнца, они сильно теряют в массе. Если бы комета Галлея имела ледяное ядро диаметром около 10 км и из своего 80-летнего периода находилась на расстоянии 0,5 а.е. от Солнца лишь 0,3 года, то для полного её испарения потребовалось бы только 1300 оборотов, всего-то каких-то 100 тысяч лет. В масштабах времен жизни Солнечной системы (5 миллиардов лет) это ничтожно мало! Поэтому кометы и не появляются на небе каждую ночь (они не могут накопиться в большом количестве).

Появление кометы с периодом, сравнимым с периодами обращения больших планет вокруг Солнца, – редкое событие потому, что требуется благоприятное стечение обстоятельств, при которых тело, пролетая в окрестности Солнца, должно испытать сильное воздействие одной из больших планет. Планета должна так изменить траекторию движения тела, чтобы из длиннопериодической или одноразовой кометы получилась короткопериодическая. Какова вероятность такого события? Это отдельный интересный вопрос.

Если бы сейчас на небе появлялась в среднем за десять лет одна комета, похожая по характеристикам на комету Галлея, то это означало бы, что одновременно существует порядка десятка тел, которые периодически появляются вблизи Солнца и видны как кометы. Если время жизни одной такой кометы порядка 100 тысяч лет, то отсюда следует вывод, что частота появления таких комет из облака Оорта примерно одна за десять тысяч лет. Если мы предположим, что вероятность появления заметных комет во времени сохраняется, то за время существования Земли (5 миллиардов лет) появилось и успело испариться около Солнца примерно полмиллиона комет типа кометы Галлея. С. Варламов. 28 Апреля 2000 г.